

## 平面ステージの精密位置決めに関する研究

著者	出島 秀一
号	3119
発行年	2003
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/8391">http://hdl.handle.net/10097/8391</a>

氏 名	出 島 秀 一
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成 16 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	平面ステージの精密位置決めに関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 清野 慧
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 清野 慧      東北大学教授 江村 超 東北大学教授 厨川 常元      東北大学助教授 高 偉

## 論 文 内 容 要 旨

リニアモータを平面状に配置して、一段構造で軽量の可動部を駆動する平面ステージは、多自由度かつ高速・高精度な位置決めが可能な機構であると期待されている。しかし、既存のセンサ技術では、検出原理やその構造からの制限により多自由度平面モータの利点を十分に生かすことができなかった。平面モータの利点を生かした精密位置決めを実現するには、まず多自由度平面モータに有効な位置検出センサの開発が必要であり、それを融合した多自由度平面モータの有効性を明らかにする必要がある。本論文は、多自由度位置を検出できるセンサ“サーフェスエンコーダ”を開発し、それを適用した多自由度平面ステージについての研究をまとめたものである。

### 第 1 章 序論

工業製品の小型化・高精度化・高集積化に伴い、加工・計測の精度向上の要求が高くなっており、現在ではその要求精度が nm オーダに達している。精密な加工・計測にはワークやプローブなど可動部の位置を正しく決定する精密位置決め技術が必要不可欠である。それを担う精密位置決め装置は、1つの駆動軸に対して“計測”“制御”“駆動”の3つの要素をフィードバック結合させることで実現されてきた。また一方で、可動部位置を空間内で一意に決めるには  $XY\theta_x\theta_y\theta_z$  の 5 自由度を固定する必要がある場合が多い。つまり、より高い位置決め精度を達成するには、可動部のより多くの自由度を計測し、その情報を基に正しく制御する必要がある。

多自由度駆動機構については多くの研究がなされており、姿勢誤差補正を含めた 2 次元平面内の位置決めには、平面モータ駆動の多自由度位置決めステージが有力視されている。この平面ステージでは、可動部が一段構造であるために軽量となり、モーメント変動が少ないという利点があるため、実用化もされ始めている。しかしながら、多自由度位置を検出するセンサについては十分に検討されてこなかった。

本研究は、位置決めステージ可動部の姿勢誤差を含む面内位置を検出するセンサ、“サーフェスエンコーダ”を開発し、それを適用した多自由度平面ステージを提案することを目指すとして行う。 $XY\theta_z$  3 自由度の位置を制御する 3 自由度ステージと、 $XY\theta_x\theta_y\theta_z$  5 自由度位置を制御できる 5 自由度ステージの 2 種類の位置決め装置の開発を行い、その有効性を明

らかにする。

## 第2章 3自由度サーフェスエンコーダ

まず、平面ステージへの適用を考慮し、 $XY\theta_z$  3自由度位置を検出できるサーフェスエンコーダの開発を行った。サーフェスエンコーダは、 $XY$ 平面内にピッチ  $100\text{ }\mu\text{m}$ 、振幅  $0.1\text{ }\mu\text{m}$ の微細2次元正弦波構造を構築した基準格子(2次元角度格子)の局所傾斜を2次元角度センサで読み取ることで、面内 $XY$ 位置を検出するエンコーダとして提案されており、1ピッチ内の内挿変位検出の有効性についてはすでに示唆されている。本研究では、角度センサを2つ用いることで、 $XY$ 変位について1ピッチを越える外挿変位検出と、 $\theta_z$ 変位検出も可能となる原理を提案した。サーフェスエンコーダは2次元平面内の $XY$ 変位を検出するという構造であり、大きな $XY$ 変位が可能な平面ステージ用位置センサに適している。また、読み取り装置には角度センサを用いているため、角度格子と角度センサ間距離の変動に影響を受けないという利点がある。さらに、レーザ干渉測長システムと異なり、レーザ行路長を短くできるため空気の揺らぎなど環境変化に強いという特長もある。

サーフェスエンコーダの有効性を確かめるために、平面ステージへの搭載を考慮した小型角度センサを試作した。試作した角度センサは、オートコリメーション法で角度を検出する光学式角度センサであり、非接触かつ高速に角度格子を読み取ることができるため、高速・高精度検出に適したセンサである。角度格子を読み取る角度センサのプロープにはマルチビームを用いており、角度格子の形状誤差・ピッチ誤差による変位検出誤差を平均効果により低減している。性能評価の結果、 $XY$ 変位を方向弁別も含めた外挿により、 $40\text{ mm}$ の測定範囲でサブミクロンの精度で検出できることを確認した。また、 $XY\theta_z$  3自由度の独立検出可能性と $XY\ 20\text{ nm}$ 、 $\theta_z\ 0.2\text{ arcsec}$ の検出分解能を有することを確認し、サブミクロンレベルの位置決めを達成するための平面ステージ用位置センサとしての有効であることを示した。

## 第3章 3自由度平面ステージの精密位置決め

3自由度サーフェスエンコーダを位置センサに用いた3自由度平面ステージを開発した(図1)。平面モータは4つの2相リニアモータを平面状に正方形配置した構造で、可動部が一段構造ながら $XY\theta_z$  3自由度の駆動ができる。可動部質量を軽くできるため、高速移動に有利であり、また、モーメント変動が少ないため、安定した位置決めを実現できるという利点がある。ステージの制御に必要なモータ推力特性をシミュレーションと実験で

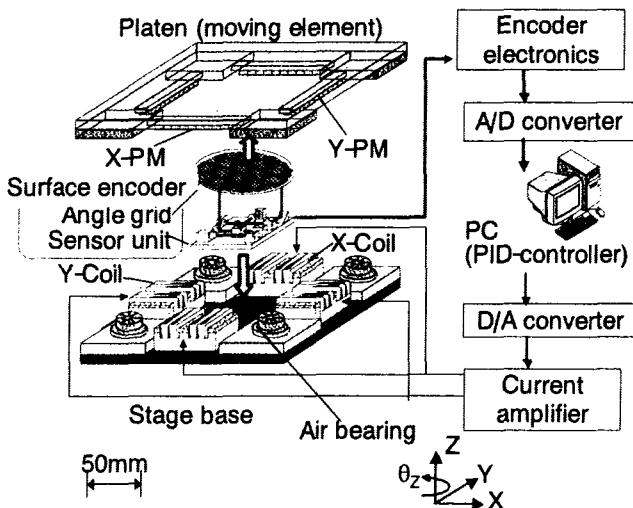


Fig.1 Schematic of the three DOF planar motion stage

確認し、全可動範囲において一様の推力を発生させるための整流方法を検討した。この結果を基にステージ動力学モデルを構築し、センサ検出点の違いが高周波領域におけるステージの安定制御に与える影響を考察した。この結果、サーフェスエンコーダが既存のレーザ干渉計に比べ、構造および検出原理が高周波領域におけるステージ安定制御に有利であることを明らかにした。ステージ駆動実験の結果、位置センサをステージ内部に搭載したコンパクトな平面ステ

ージは、外乱の影響を受けにくく安定した位置決めが可能であることを確認した。また、 $XY\theta_z$  3 自由度の位置制御が可能であり、 $XY$  100 nm,  $\theta_z$  0.5 arcsec の駆動分解能で、応答帯域 70 Hz まで安定した駆動が可能であることを実験的に明らかにした。

#### 第 4 章 走査型プローブを用いた 5 自由度サーフェスエンコーダ

より精密な位置決めを行うには、 $XY\theta_z$  3 自由度のみならず、姿勢誤差 $\theta_x\theta_y$  も制御する必要がある。そこで、サーフェスエンコーダの検出自由度を  $XY\theta_x\theta_y\theta_z$  5 自由度まで拡張することを検討した。基準体は同じく 2 次元角度格子を用いており、それを走査型角度センサと静止角度センサを組み合わせた角度センサユニットを用いて読み取ることで相対変位を検出する構成とした。走査型プローブでの検出方法を切り替える 2 つの検出モードを用いることで、性質の異なる 2 種類の多自由度同時検出を行う原理を提案した。一つ目のモードは、プローブを走査することで得られる正弦波信号と静止角度センサの信号を用いて  $XY\theta_x\theta_y\theta_z$  5 自由度同時検出を行う多自由度検出モードである。この検出モードでは、検出速度がプローブ走査速度に依存するため、高速検出が難しいという欠点はあるが、走査型センサ出力の時間変化を演算することで  $XY\theta_x\theta_y$  4 自由度を、また、ある時刻の 2 本のセンサ出力から $\theta_z$  変位 1 自由度の合計 5 自由度を同時検出できる。第 2 のモードである高速検出モードは、走査型プローブを静止させ、2 本のセンサ出力より 3 自由度サーフェスエンコーダと同じ原理で、 $XY\theta_z$  3 自由度の高速検出を実現するものである。このサーフェスエンコーダをステージ制御用の位置センサに適用した場合、ステージの高速移動時には高速検出モードを、精密位置決め時には多自由度検出モードを用いることで、高速 Point-To-Point 制御が可能となる。試作したサーフェスエンコーダの評価実験の結果、2 つの検出モードにおいて多自由度を分離独立して検出でき、サブミクロンの検出分解能を有することを確認した。この結果により、既存のサーフェスエンコーダの利点を生かしつつ機能を大幅に拡大することに成功した。

#### 第 5 章 マルチプローブを用いた 5 自由度サーフェスエンコーダ

第 4 章で開発したプローブ走査型サーフェスエンコーダは、多自由度検出が可能であるが、角度検出プローブを走査するため検出速度が遅いという欠点があった。そこで、5 自由度位置検出のさらなる高速化を目指し、2 種類の角度センサ 3 本による 5 自由度検出が可能なサーフェスエンコーダを開発した。2 本のマルチビーム角度センサによる  $XY\theta_z$  3 自由度変位の検出、1 本のシングルビーム角度センサによる $\theta_x\theta_y$  2 自由度変位の検出により、プローブを走査することなく 5 自由度の同時検出を可能とする原理を提案した。センサ設計に関しては、波動光学を用いてセンサ受光部での光強度変化を解析することで、基準格子を角度格子 1 種類としながら、2 種類の角度センサプローブを実現した。試作した角度センサユニットの寸法は、3 本の角度センサを含んで 66 mm (W) × 126 mm (L) × 47 mm (H) とコンパクトにすることに成功し、ステージへ容易に組み込むことが可能となった。信号処理部は、アナログ回路でセンサ出力を角度情報に変換し、16MHz クロック動作のデジタル回路にて外挿と方向弁別を行っており、高速な信号処理が可能である。評価実験により、検出速度 550mm/s と高速な 5 自由度検出を実現しながら、一方では分解能  $XY$  30 nm,  $\theta_x\theta_y$  0.01 arcsec,  $\theta_z$  0.3 arcsec と高分解能を実現した。また、外挿変位の検出精度評価からはサブミクロンレベルの検出精度を有することを明らかにした。

#### 第 6 章 5 自由度平面ステージの精密位置決め

第 5 章で試作した 5 自由度サーフェスエンコーダを適用した 5 自由度平面ステージを開発した詳細を第 6 章で示している。図 2 に示すように、平面上に T 字型に配置した 3 つの

リニアモータと3本のPZTを用いて一段構造の可動部を直接駆動することで、XY位置のみならず、微小 $\theta_x\theta_y\theta_z$ 位置を制御できる平面ステージを構築した。可動部はPZT先端に取り付けられたエアベアリングにより静圧浮上されており、非接触で支持されている。このエアベアリング内には永久磁石が埋め込まれており、ベースへの吸着力とエアの反発力を組み合わせることで高い支持剛性を得ている。位置センサには、構造や検出原理が平面ステージに有利なマルチプローブ型サーフェスエンコーダを適用した。エンコーダの角度格子を可動部中央に固定し、角度センサをステージベースに設置することで、可動部の相対変位5自由度を検出する構成とした。この位置センサはステージ内部に組み込むことが可能であるため、既存のレーザ干渉測長システムを用いた場合に比べ、ステージシステム全体の設置面積を小さくすることに成功した。次に、ステージの機械特性から動力学モデルを構築し、ステージ挙動を明確に示すと共に、コントローラの設計を行った。PCを用いたコントローラはリアルタイムOS上でPID制御を行うもので、制御周期を0.6msと高速にすることで、ステージの高速・高分解能駆動を目指した。駆動実験により、位置決め分解能XY 50 nm、姿勢誤差を $\theta_x\theta_y$  0.1 arcsec,  $\theta_z$  0.5 arcsecとサブミクロンの位置決めに十分な分解能を有することを確認した(図3)。また、ステップ応答実験により、5自由度を独立して制御でき、高速な位置決めが可能であることを示した。さらに、 $\theta_x\theta_y$ 姿勢誤差まで含めた多自由度位置を制御することで、より精密な位置決めが可能であることを明確に示した。この成果は、多自由度位置の計測・制御の有効性を示す重要な結果であると考えられる。

## 第7章 結論

多自由度位置決めの有効性をまとめた。

以上、多自由度平面ステージの精密位置決め技術のさらなる向上をセンサ開発の点から考察するために、3自由度と5自由度の2種類の多自由度平面ステージを開発した。まず、位置検出に必要な不可欠な位置センサとしてサーフェスエンコーダの開発を行い、簡易なセンサシステムによる多自由度同時検出を可能にした。次に、サーフェスエンコーダを適用した多自由度ステージを構築した。多自由度平面ステージの開発により、本ステージが多自由度精密位置決めに有効であることを確認できたのみでなく、センサ技術開発に焦点を当てた多自由度位置決め装置の開発が将来期待される精密・超精密位置決め技術にとって重要であることを明らかにした。

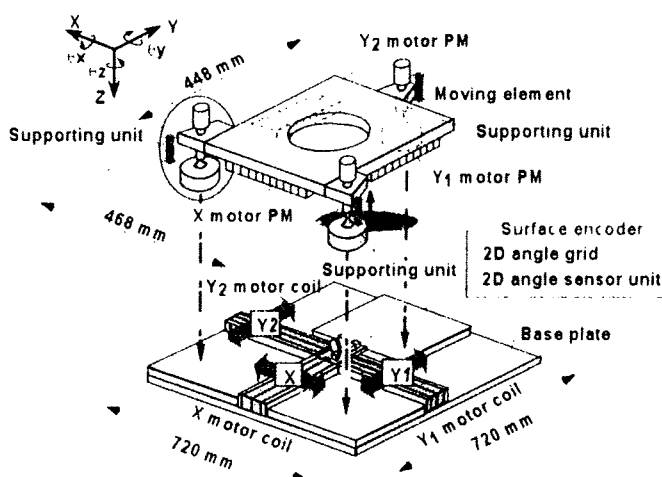


Fig.2 Five DOF planar stage

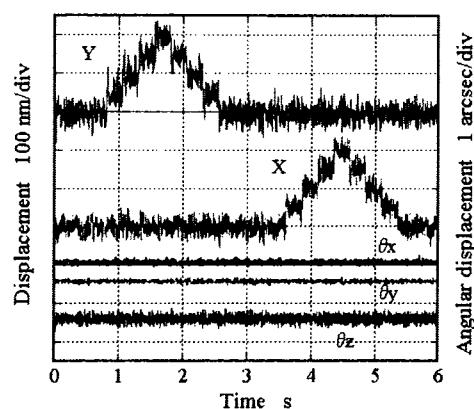


Fig.3 50 nm step response in the XY directions

# 論文審査結果の要旨

リニアモータを平面状に配置して、一段構造で軽量の移動部を動かす平面ステージは、多自由度かつ高速な駆動が可能な機構である。本論文はこれらの利点を持つ平面ステージにサーフェスエンコーダという新しい位置センサを融合させることによって、高速で高精度な多自由度位置決めシステムを提案し、具現化するための研究をまとめたもので、全編7章からなる。

第1章は序論であり、研究の背景と目的を述べている。

第2章では、 $XY\theta_z$  3自由度を検出できるサーフェスエンコーダの開発について述べている。まず2本の光学式角度センサで基準体の2次元正弦波形状を読み取ることで、非接触に高速で3自由度位置を検出する原理を提示した。次に設計手順を示したあと、実際に製作したサーフェスエンコーダの詳細を述べている。エンコーダの性能評価の結果、3自由度の検出可能性とサブミクロンの検出分解能を有することを確認している。この結果は、サーフェスエンコーダを位置センサとして用いた位置決め装置が、サブミクロンレベルの位置決めが可能なことを示す重要な成果である。

第3章では、3自由度サーフェスエンコーダを位置センサとして用いた3自由度平面ステージを製作し、その有効性を示している。位置センサをステージ内部に搭載したコンパクトな位置決め装置は、外乱の影響を受けにくく安定した位置決めが可能であることを明らかにしている。駆動実験の結果、 $XY\theta_z$  3自由度の位置制御が可能であり、サブミクロンの駆動分解能で、高周波域まで安定した駆動が可能であることを示している。これはサーフェスエンコーダと平面ステージを融合させることによって、高精度な位置決めシステムを実現する重要な試みである。

第4章では、サーフェスエンコーダの検出自由度を5自由度まで拡張することを検討している。走査型光学式角度センサと1本の角度センサを組み合わせ実現したサーフェスエンコーダは、 $XY\theta_x\theta_y\theta_z$  5自由度の同時検出を実現した。また、走査型角度センサを静止させて用いることで、 $XY\theta_z$  3自由度の高速検出も可能としている。実現した5自由度サーフェスエンコーダは、精密ステージの高速のPoint-To-Point制御に特に有効であり、既存のサーフェスエンコーダの利点を生かしつつ機能を大幅に拡大した有益な成果である。

第5章では、複数の角度センサを用いたサーフェスエンコーダで多自由度検出の高速化を検討している。まず、2本のマルチビーム角度センサと1本のシングルビーム角度センサを用いた高速5自由度検出の原理を示している。試作したサーフェスエンコーダが、高速5自由度検出を実現しながら、サブミクロンレベルの検出分解能を有することを実験的に明らかにした。これらの結果は、サーフェスエンコーダの高速・多自由度検出を実現する上で、重要かつ有効な指針を与えており、実用上の価値が高い。

第6章は、第5章で示した5自由度サーフェスエンコーダを位置センサとして用いた5自由度平面ステージについての詳細を示している。提案する5自由度平面ステージは、リニアモータとPZTを組み合わせることで、 $XY$ 位置のみならず、微小 $\theta_x\theta_y\theta_z$ 位置を制御できる。駆動実験により、姿勢誤差まで含めた多自由度位置を制御することで、より精密な位置決めが可能であることを明確に示している。この成果は、提案のシステムによる多自由度位置の計測・制御の有効性を示す重要な結果であり、高く評価される。

第7章は、結論である。

以上を要するに、本論文はサーフェスエンコーダと平面ステージを組合わせた多自由度の精密位置決めシステムを提案し、その実現可能性を明らかにしたものである。位置センサの開発を核とした本論文の研究は、従来と全く異なるアプローチから行われたもので、サーフェスエンコーダが平面ステージの位置センサとして有効であることを示すだけではなく、精密工業で多用される多自由度位置決めシステムの構築に新しいコンセプトを与えたもので、精密工学とりわけ精密位置決め技術の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。